



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

TEHO-OPERAATIOVAHVISTIMIEN NYKYTILAKARTOITUS

Current state of power operational amplifiers

Petri Sorsa

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Petri Sorsa

Teho-operaatiovahvistimien nykytilakartoitus

2018

Kandidaatintyö.

18 s.

Tarkastaja: professori Pertti Silventoinen

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on kartoittaa markkinoilla tällä hetkellä olevien, suuriin nopeuksiin kykenevien, teho-operaatiovahvistimien ominaisuuksia. Työssä pyritään erityisesti etsimään sopivia teho-operaatiovahvistimia tehonsiirtoverkkoon kytkettävään tehoelektronikan häiriöitä suodattavaan aktiiviseen suodattimeen.

Työ suoritetaan kirjallisuus- ja tuotelistaustutkimuksena. Ensin määritellään kirjallisuuden avulla tehoelektronikan aktiivisen häiriösuodattimen teho-operaatiovahvistimelta vaatimat raja-arvot, jonka jälkeen puolijohdevalmistajien tuotelistauksista etsitään raja-arvot ylittävät yleiskäyttöiset komponentit. Sopivista komponenteista listataan suodatinsovelluksen kannalta keskeisimmät suoritusarvot ja tehdään yleiskatsaus komponenttien käyttöominaisuuksiin, kuten syöttöjännitevaatimuksiin, lämpötilakestoisuuksiin ja kotelointeihin.

Aktiivisen suodatinsovelluksen kannalta tärkeimmiksi teho-operaatiovahvistimen suoritusarvoiksi todettiin kaistanleveys, tehontuottokyky ja siten virran- sekä jännitteentuottokyky ja operaatiovahvistimen nopeutta kuvaava slew rate. Näiden suureiden avulla suoritettiin komponenttien valikointi ja sopivat komponentit taulukoitiin.

Määritelmiin sopivia yleiskäyttöisiä teho-operaatiovahvistimia löytyi 27 kpl. Numeeriset raja-arvot täyttäviä komponentteja löytyi reilusti enemmänkin, mutta suurin osa niistä oli erityisiin käyttötarkoituksiin suunniteltuja. Kaiken kaikkiaan markkinoilla on tällä hetkellä tarjolla paljon erilaisia teho-operaatiovahvistimia. Parhaimmillaan ne kykenevät satojen ja jopa tuhansien megahertsien kaistanleveyteen, yli ampeerin antovirtoihin ja noin sadan voltin antojännitteisiin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Petri Sorsa

Current state of power operational amplifiers

2018

Bachelor's Thesis.

18 p.

Examiner: professor Pertti Silventoinen

The aim of this bachelor's thesis is to chart and tabulate characteristics of wideband power operational amplifiers currently on the market. An active filter for filtering disturbances caused by power electronics can be made with power operational amplifier. In particular, the work seeks to find suitable power op amps for the active filter application.

The work is carried out as a literature and product catalog study. First, the most significant op amp performance characteristics and the threshold values required by the active filter application are defined with the literature. Then the general-purpose components exceeding the thresholds are searched from the product lists of the semiconductor manufacturers. After that, the most important characteristics and features of the appropriate components are tabulated and an overview of component features such as supply voltage requirements, maximum operating temperature values and enclosure types, is made.

For the active filter application, the most significant performance characteristics of the power operation amplifier were found to be the gain-bandwidth product, output voltage, output current and the slew rate. By these quantities and their thresholds, component selection was performed, and components were tabulated.

There were 27 general purpose power amplifiers, which exceeded the thresholds. Components exceeding the threshold values were found to be much more, but most of them were designed for special applications. All in all, there are currently many different power operational amplifiers available on the market. At best, they are capable of bandwidths over hundreds or even thousands of megahertz, over one ampere output currents and output voltages of about hundred volts.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
1.1	Tausta	6
1.2	Tavoite, tutkimuskysymykset ja rakenne	7
2.	Operaatiovahvistimien suoritusarvot.....	8
2.1	Vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo GBW	8
2.2	Slew rate	8
2.3	Tehokomponentin määritelmä ja antovirta.....	8
2.4	Suodatinsovelluksen teho-operaatiovahvistimelta vaatimat raja-arvot.....	9
3.	Teho-operaatiovahvistimet valmistajittain	11
3.1	Texas Instruments.....	11
3.2	Analog Devices ja Linear Technology	12
3.3	Apex Microtechnology	13
3.4	MSK/Anaren.....	14
3.5	Muut valmistajat.....	15
3.6	Havainoja teho-operaatiovahvistintarjonnasta ja tuotelistauksista.....	15
4.	Yhteenveto ja johtopäätelmät	17
	Lähteet	19

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

BW	Bandwidth, kaistanleveys
GBW	Gain-Bandwidth Product, vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo
typ	typical, tyypillinen arvo
peak	hetkellinen huippuarvo

I	virta
P	teho
V	jännite
f	taajuus

Alaindeksit

stot	supply total, kokonaissyöttö/käyttö-
out	output, lähtö/anto-
cc	supply, syöttö/käyttö-
pp	peak to peak, huipusta huippuun
HV	high voltage, korkea jännite

1. JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä perehdytään tällä hetkellä markkinoilla olevien tehooperaatiovahvistimien suoritusarvoihin ja käyttöominaisuuksiin. Työssä keskitytään lähinnä näiden operaatiovahvistimien tehontuotto- ja korkeataajuusominaisuuksiin. Tutkimuksen tarkoituksena on löytää käyttökelpoisia komponentteja aktiiviseen suodattimeen, joka kykenisi suodattamaan korkeataajuisia häiriöitä pois tehoa siirtävistä verkoista. Tässä työssä korkeilla taajuuksilla tarkoitetaan taajuusaluetta 10-1000 MHz.

1.1 Tausta

Operaatiovahvistimet ovat integroituja piirejä (IC, mikropiiri), jotka kehitettiin analogisia laskuoperaatioita, kuten yhteen- ja vähennyslaskua, varten. Integroidulla piirillä tarkoitetaan rakennetta, jossa monia puolijohdekomponentteja (esim. transistori ja diodi) ja passiivisia komponentteja (esim. vastus ja kondensaattori) on pakattu samaan pieneen koteloon. Digitaalitekniikan myötä operaatiovahvistimien käyttö laskuoperaatiossa on vähentynyt ja operaatiovahvistimia käytetään nykyään eniten piensignaali vahvistimina erilaisine sovelluksineen, joita ovat mm. aktiiviset suodattimet ja erotusvahvistimet. [1]

Tiedonsiirtotekniikan kehityksen ja yleistymisen myötä operaatiovahvistimia on alettu käyttämään myös suuritehoisempien signaalien tuottamiseen. Tehooperaatiovahvistimia käytetään tiedonsiirrossa siirtolinjojen syöttö vahvistimina (englanniksi line driver) esimerkiksi DSL-järjestelmissä [2]. Operaatiovahvistimen/integroidun piirin etuja erilliskomponenttiteotukseen verrattuna ovat mm. osien vähäisempi määrä piirilevyllä ja kokonaisuutena luotettavampi rakenne [3]. Pienempi integroitu piiri mahtuu pienempään tilaan ja on kokonsa vuoksi vähemmän alttiina rf-häiriöille. Integroitujen piirien käyttö tekee laitteesta modulaarisemman ja helpottaa siten laitteen suunnittelua, valmistusta ja huoltoa [3].

Tehooperaatiovahvistimella olisi mahdollista toteuttaa aktiivinen suodatin, joka pystyisi suodattamaan tehoelektronikan kytkinkäytön aiheuttamia korkeataajuisia häiriöitä pois sähköverkosta tai jostakin muusta tehonsiirtolinjasta, mikäli tarpeeksi korkealle yltävän taajuuskaistan ja tarpeeksi suureen tehontuottoon kykenevä komponentti löytyisi. Suodattimen toiminta perustuisi vastakkaisvaiheisuuteen; tietokone etsisi ja havaitsisi verkosta häiriöitä ja muodostaisi häiriöstä vastavaiheisen signaalin. Tämän tehooperaatiovahvistin vahvistaisi alkuperäisen häiriön suuruiseksi ja syöttäisi sen verkkoon, jolloin vastakkaiset vaiheet kumoaisivat toisensa ja häiriö poistuisi. Aktiivinen suodatin parantaisi suodatuksen joustavuutta, sillä se kykenisi passiivista suodatusta paremmin suodattamaan jaksottomia ja vaihtelevia häiriöitä. Lisäksi aktiivinen suodatin on mahdollista rakentaa fyysisesti pienemmäksi, sillä se ei tarvitse suuria reaktiivisia komponentteja, kuten kondensaattoreita ja keloja.

1.2 Tavoite, tutkimuskysymykset ja rakenne

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millaisiin suoritusarvoihin teho-operaatiovahvistimet tällä hetkellä kykenevät kaistanleveyden sekä tehon- ja erityisesti virrantuoton osalta, ja ovatko nämä suoritusarvot riittäviä edellä kuvatun aktiivisen suodattimen toteutukseen. Tavoitteena on siis myös etsiä suodatinsovellukseen sopivia komponentteja. Tutkitaan myös, millaisia tutkitut teho-operaatiovahvistimet ovat käyttöominaisuuksiltaan, esim. millaista käyttö sähköä ne tarvitsevat.

Tutkimuksen tutkimuskysymykset:

- Millaiseen tehontuottoon teho-operaatiovahvistimet kykenevät leveällä taajuuskaistalla?
- Onko valmistajilla tarjolla operaatiovahvistinta, jolla voisi toteuttaa rf-taajuisten aktiivisen suodattimen tehonsiirtoverkkoon?
- Mitä leveän taajuuskaistan teho-operaatiovahvistimet tarvitsevat toimiakseen (mm. käyttö sähköä)?

Luvussa 2 käsitellään operaatiovahvistimien korkeataajuus- ja tehontuotto-ominaisuuksia kuvaavia mitattavia suureita yleisellä tasolla ja määritellään numeeriset raja-arvot suodatinsovellukseen kelpaavalle teho-operaatiovahvistimelle. Luvussa 3 käydään läpi eri puolijohdevalmistajien tuotelistauksia ja listataan luvussa 2 määritetyt raja-arvot täyttävät teho-operaatiovahvistimet valmistajittain ja eritellään komponenttien tärkeimpiä ominaisuuksia (mm. suoritusarvot, käyttöjännitteet, kotelot) valmistajakohtaisesti. Luvussa 4 tehdään johtopäätöksiä ja pohditaan, löytyikö suodatinsovellukseen oikeasti käyttökelpoista komponenttia sekä vastauksia tutkimuskysymyksiin ja toteutuiko tutkimuksen tavoite.

2. OPERAATIOVAHVISTIMIEN SUORITUSARVOT

Operaatiovahvistimen korkeiden taajuuksien käsittelykykyä kuvaavat suureet GBW sekä slew rate, joita valmistajat käyttävät yleisesti kertoessaan tuotteidensa taajuusominaisuuksista. Operaatiovahvistimien tehontuottokykyä voidaan arvioida sen jännitevahvistuksen ja erityisesti antovirran avulla.

2.1 Vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo GBW

Vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo, englanniksi Gain-Bandwidth Product eli GBW tai GBWP, kertoo takaisinkytketyn operaatiovahvistimen jännitevahvistuksen absoluuttisen arvon ja sen käsittelysignaalin taajuuskaistan leveyden kertolaskun tulon [1]. Suureen yksikkönä käytetään taajuusyksikköä hertsi (Hz), sillä laskennassa taajuuskaistan leveys sijoitetaan yksikössä Hz ja vahvistus sijoitetaan yksiköttömänä suhdelukuna.

Suoritusarvoista GBW kertoo parhaiten operaatiovahvistimen korkeataajuusominaisuuksista, sillä se kertoo suoraan mihin taajuuteen asti komponentin käsittelykyky riittää, mikäli jännitevahvistus on 1. Jos kuitenkin halutaan suurempi jännitevahvistus, kaventaa tämä komponentin käsittelykaistan leveyttä.

2.2 Slew rate

Slew rate kuvaa takaisinkytketyn operaatiovahvistimen kykyä tuottaa nopeasti muuttuvia signaaleja. Se kertoo, miten paljon tulosignaalin jännite voi muuttua aikayksikössä, jotta operaatiovahvistin kykenee vielä tuottamaan tulosignaalia vastaavan lähtösignaalin ilman lähtösignaalin vääristymistä eli säröytymistä [4]. Slew rate mitataan useimmiten yksikössä V/ μ s, jolloin se kertoo montako voltia signaalin amplitudi voi muuttua mikrosekunnissa, jotta lähtösignaalin muoto säilyy vielä tulosignaalia vastaavana. Slew ratelle ilmoitettavat arvot ovat usein tyypillisiä arvoja (typ).

2.3 Tehokomponentin määritelmä ja antovirta

Lähes kaikille operaatiovahvistimille tyypillinen ominaisuus on niiden suuri jännitevahvistus, joka voidaan asettaa halutuksi ulkoisilla komponenteilla takaisinkytkennän määrää säätämällä [1]. Ideaalinen operaatiovahvistin tuottaa enintään syöttöjännitteensä suuruisia jännitesignaaleja [4], mutta reaaliset komponentit eivät aina tähän pysty. Syöttöjännitteen ollessa liian pieni lähtösignaali voi leikkautua. Tehon tuottamiseen tarvitaan jännitevahvistuksen lisäksi myös kyky tuottaa suurempia virtoja, johon harvemmat operaatiovahvistimet kykenevät.

Operaatiovahvistimen antovirta (engl. output current) kertoo, kuinka suuren virran operaatiovahvistin pystyy tuottamaan kuormituspiiriinsä. Valmistajat ilmoittavat komponentilleen yleensä antovirran tyypillisen arvon (typ), mutta tarvittaessa ne pystyvät tuottamaan suurempiakin virtoja hetkellisesti (peak).

Valmistajasta riippuen tehokomponentin määritelmä vaihtelee. Esimerkiksi Texas Instruments pitää suurta virtaa tuottavan teho-operaatiovahvistimen rajana 200 mA:n virtaa [2] ja Analog Devices:lla vastaava raja on 100 mA [5]. Teho-operaatiovahvistimet kykenevät tuottamaan tyypillisesti muutamien satojen milliampeerien antovirtoja, joilla on mahdollista tuottaa kuormaan muutamia watteja tehoa käytetystä jännitteestä riippuen.

2.4 Suodatinsovelluksen teho-operaatiovahvistimelta vaadittavat raja-arvot

Tehoelektroniikan tuottamien rf-häiriöiden taajuuskaista ylsi n. 30 MHz:n taajuuteen asti jo 20 vuotta sitten [6] ja ajan kuluessa kytkentätaajuudet ovat kasvaneet, jolloin myös häiriöiden taajuuskaista yltää yhä korkeammille taajuuksille. Alle 10 MHz:n taajuiset sähkömagneettiset häiriöt siirtyvät pääasiassa johtumalla johtimia pitkin ja häiriöiden taajuuden ylittäessä 10 MHz säteilemällä siirtyvien häiriöiden osuus kasvaa. Lisäksi häiriöt voivat siirtyä häiriölähteestä kapasitiivisesti ja induktiivisesti. Kuitenkin alle 30 MHz:n taajuuksilla johtuvat häiriöt ovat suurin ja siten merkittävin häiriötekijä. Suurin osa tehoelektroniikan tuottamista häiriöistä on vielä matalammilla taajuuksilla, noin 10-150 kHz:n taajuusalueella. Näin ollen aktiivinen suodatin suodattaa pääasiassa alle 30 MHz:n taajuisia, johtumalla siirtyviä häiriöitä. [7]

Suodatinsovelluksessa teho-operaatiovahvistimen kaistanleveyden olisi kuitenkin hyvä yltää vähintään noin 50 MHz:n taajuuteen asti, jotta se kykenisi tarvittaessa käsittelemään myös korkeimpia tehoelektroniikan tuottamia häiriösignaaleja. Suodattimessa komponentin GBW:n on oltava vielä tätäkin suurempi, jotta komponentti kykenisi edes pieneen jännitevahvistukseen korkeimmilla häiriötaajuuksilla vahvistuksen aiheuttamasta kaistan kaventumisesta johtuen.

Suodatin voidaan kytkeä joko sarjaan tai rinnan häiriölähteen ja siirtoverkon kanssa. Sarjaan kytketty suodatin toimii häiriöitä tasaavana jännitelähteenä, kun taas rinnan kytketty suodatin toimii häiriöitä tasaavana virtalähteenä. Eri kytkentätavat asettavat erilaiset vaatimukset teho-operaatiovahvistimelle: sarjaankytkennässä teho-operaatiovahvistimelta vaaditaan jännitteentuottokykyä ja rinnankytkennässä virrantuottokykyä. [8]

Suodatinsovellus ei siis välttämättä tarvitse teho-operaatiovahvistimelta korkeaa jännitevahvistusta, sillä teho-operaatiovahvistimen tulosignaali voidaan vahvistaa jännitteiden osalta riittävän suureksi muilla vahvistimilla ennen teho-operaatiovahvistinta tai vahvistimen jälkeen erillisellä muuntajalla. Teho-operaatiovahvistin tarjoaisi tällöin riittävän virran tehon tuottamiseksi.

Asetetaan suodatinsovellukseen sopivan teho-operaatiovahvistimen GBW:n alaraja arvoon 100 MHz, jolloin tähän kykenevä komponentti pystyy tuottamaan yli 30 MHz:n taajuisia signaaleja pienellä jännitevahvistuksella tai matalampitaajuisia signaaleja suuremmalla jännitevahvistuksella.

30 MHz:n taajuudella signaalin jaksonaika on noin $0,033 \mu\text{s}$ ja 1 MHz:n vastaava jaksonaika on $1 \mu\text{s}$. Jos signaalin amplitudissa tapahtuu jakson aikana suuria muutoksia, ei operaatiovahvistin välttämättä pysy slew ratensa vuoksi enää muutoksessa mukana ja signaali säröytyy. Jos signaalin jännitevaihtelu on suuri, slew raten merkitys korostuu. Suodatinsovelluksessa teho-operaatiovahvistinta käytetään tehonsiirtoverkkojen kanssa, jolloin jännitteet voivat olla jopa satoja voltteja. Tällöin myös häiriöiden jännitevaihtelut voivat olla suuria, ja siksi teho-operaatiovahvistimen olisi kyettävä tuottamaan nopeasti muuttuvia signaaleja. Asetetaan slew raten minimivaatimukseksi $100 \text{ V}/\mu\text{s}$.

Teho-operaatiovahvistimen olisi kyettävä tuottamaan tehoa ja sen seurauksena virtaa. Alle ampeerin virralla saadaan jo tuotettua muutamia watteja tehoa, kun jännitettä on muutamia voltteja, esim. 200 mA :n virralla ja 5 V :n jännitteellä saadaan 1 W tehoa. Valitaan suodatinsovellukseen sopivan teho-operaatiovahvistimen antovirran alarajaksi 200 mA Texas Instrumentsin tehomäärittelyn mukaisesti [2], sillä 200 mA :n virralla saadaan jo tuotettua muutamia watteja tehoa, kun jännite on muutamia kymmeniä voltteja.

3. TEHO-OPERAATIOVAHVISTIMET VALMISTAJITTAIN

Tässä luvussa taulukoidaan kunkin puolijohdevalmistajan edellä mainitut raja-arvot täyttävät teho-operaatiovahvistimet. Tässä listauksessa käsitellään vain omiin puolijohdekoteloihinsa kasattuja operaatiovahvistimia, eli listauksesta on jätetty selkeyden vuoksi pois erillisille piirilevyille oheiskomponenttien kanssa kootut teho-operaatiovahvistintuotteet, joita muutamilla valmistajilla on tarjolla. Monet valmistajat ovat listanneet erikseen korkeaan jännitteentuottoon ja korkeaan virrantuottoon kykenevät mallit.

3.1 Texas Instruments

Texas Instruments on maailman suurimpia puolijohdevalmistajia, joten sillä on suuri valikoima erilaisia teho-operaatiovahvistimia. Taulukossa 1 on esitetty Texas Instrumentsin valmistavat, korkeaan virrantuottoon kykenevät raja-arvot täyttävät komponentit. Ne ovat kaikki yleiseen käyttöön tarkoitettuja teho-operaatiovahvistimia ja tästä listauksesta on jätetty pois tiettyihin käyttötarkoituksiin tehdyt erikoiskomponentit, jotka olisivat muuten täyttäneet määritetyt raja-arvot. Texas Instrumentsilla tällaisia komponentteja oli paljon tarjolla, mm. erilaisia DSL-syöttövahvistimia. [2]

Taulukko 1: Texas Instrumentsin valmistavat, raja-arvot täyttävät korkeaan virrantuottoon kykenevät komponentit [2].

<i>Komponentti</i>	<i>I_{out} (typ, mA)</i>	<i>GBW (typ, MHz)</i>	<i>V_{stot} (min, V)</i>	<i>V_{stot} (max, V)</i>	<i>Slew rate (typ, V/μs)</i>
<i>LMH6629</i>	250	4000	2.7	5.5	1100
<i>OPA2673</i>	700	600	5.75	12	3000
<i>OPA2614</i>	350	290	5	12	145
<i>OPA2674</i>	500	250	5.75	12	2000
<i>THS3091</i>	250	235	10	30	7300
<i>OPA2677</i>	500	220	4	12.6	2000
<i>LMH6672</i>	200	180	5	12	170
<i>THS3092</i>	250	145	10	30	5700
<i>THS3122</i>	440	138	10	30	1550
<i>THS3120</i>	475	130	10	30	1500
<i>THS3115</i>	270	110	10	30	1550
<i>THS3110</i>	260	100	10	30	900

Taulukossa 1 on listattu komponenttien antovirran, GBW:n ja slew raten lisäksi komponenttien kokonaiskäyttöjännitteen V_{stot} minimi- ja maksimiarvot. Luku tarkoittaa kaksipuolista tasajännitesyöttöä, eli esim. 30 V tarkoittaa +/- 15 V syöttöä. Taulukosta nähdään, että TI:llä on monia komponentteja, joiden suoritusarvot ylittävät määritellyt raja-arvot selkeästi.

Huomioitava on, että taulukon 1 komponentit eivät pysty tuottamaan käyttöjännitettään suurempia jännitteitä, jolloin tulosignaalin ylittäessä käyttöjännitteen, lähtösignaali leikkautuu ja vääristyy. Parhaimpaan jännitteentuottoon siis kykenevät THS-sarjan komponentit, jotka kykenevät tuottamaan +/- 15 V lähtösignaaleja. Jos tehonsiirtolinjassa

esiintyisi amplitudiltaan suuria häiriöitä, eivät nämä komponentit suodatinsovelluksessa käytettäessä kykenisi niitä suodattamaan.

Taulukossa 2 onkin listattu muutamia TI:n valmistamia korkeiden jännitteiden tuottoon kykeneviä teho-operaatiovahvistimia. Nämä olisivat myös muuten sopivia suodattimeen, mutta ne ovat liian hitaita, sillä komponenttien GBW on reilusti alle määritellyn 100 MHz:n ja slew rate on alle 100 V/ μ s.

Taulukko 2: Texas Instrumentsin valmistavat, korkeaan jännitteentuottoon kykenevät komponentit [2]. Komponenttien kaistanleveys ja slew rate eivät riitä suodattimeen.

<i>Komponentti</i>	<i>I_{out} (typ, mA)</i>	<i>GBW (typ, MHz)</i>	<i>V_{stot} (min, V)</i>	<i>V_{stot} (max, V)</i>	<i>Slew rate (typ, V/μs)</i>
<i>OPA552</i>	380	12	8	60	24
<i>LM675</i>	4000	5.5	10	60	8
<i>OPA551</i>	380	3	8	60	15
<i>OPA541</i>	10000	2	20	70	10

Näin ollen taulukon 1 komponentit toimisivat suodattimessa suoritusarvojen perusteella, mikäli niiden ei tarvitse tuottaa yli +/- 15 V lähtösignaaleja.

Taulukon 1 komponentteja valmistetaan monissa eri koteloissa, mm. SOIC, VQFN, SOT-23. Nämä kaikki ovat pintaliitoskoteloita, ja komponentit tarvitsevat jäähtyksen käsittelemiensä korkeiden tehojen vuoksi. Komponenttien maksimikäyttölämpötila on kaikilla muilla komponenteilla 85°C, paitsi LMH6629:llä se on 125°C. Jäähtytyksellä varmistetaan, ettei tämä maksimikäyttölämpötila ylity. [2]

Komponenteilla on myös joukko muita ominaisuuksia, kuten osaa komponenteista saa rinnakkaisversoina esim. shutdown:lla (automaattinen sammutus) varustettuina. Osassa komponenteista on myös kaksi kanavaa. [2]

3.2 Analog Devices ja Linear Technology

Käsitellään Analog Devices'in ja Linear Technology:n tuotteet samassa listauksessa, sillä ne ovat sisaryhtiöitä. AD:lta löytyi muutama raja-arvot täyttävä yleiskäyttöön sopiva komponentti, mutta kaikki LT:n määrittelyyn täyttävät komponentit olivat lähinnä spesifeihin tiedonsiirtosovelluksiin (DSL) tarkoitettuja komponentteja [5], eikä LT:ltä siksi löytynyt listattavia yleiskäyttöisiä komponentteja.

Analog Devices ilmoittaa vertailutaulukossaan suurimmalle osalle tuotteistaan lähinnä taajuuskaistan leveyden (-3 dB BW), eikä ilmoita GBW:n arvoa [5]. Koska -3 dB BW ei huomioi jännitevahvistuksen vaikutusta kaistanleveyteen kuten GBW, voidaan BW:n alarajana käyttää arvoa 50 MHz määritellyn GBW:n alarajan 100 MHz sijaan, sillä mikäli teho-operaatiovahvistin kykenee 50 MHz:n kaistanleveyteen lähes jännitevahvistuksesta riippumatta, sen kaistanleveys on suodattimeen riittävä.

Analog Devices myös listaa erikseen korkeaan jännitteentuottoon, korkeaan virrantuottoon ja suuriin nopeuksiin kykenevät komponenttinsa, mutta taulukon 3 listaukseen on sisällytetty luokittelusta riippumatta AD:n yleiskäyttöiset komponentit, jotka täyttävät määritellyt raja-arvot.

Taulukko 3: Analog Devices:in valmistamat, raja-arvot täyttävät yleiskäyttöiset teho-operaatiovahvistimet [5].

<i>Komponentti</i>	<i>I_{out} (typ, mA)</i>	<i>-3dB BW (typ, MHz)</i>	<i>V_{stot} (min, V)</i>	<i>V_{stot} (max, V)</i>	<i>Slew rate (typ, V/μs)</i>
AD8017	270	160	4.4	12	1600
AD815	500	120	10	36	900
ADA4870	1000	52	10	40	2500

AD ei ilmoita komponenttiansa käyttötarkoitusta yhtä selkeästi kuin TI, sillä AD kertoo kustakin komponentistaan vain, mitä käyttötarkoitusta sen suunnittelussa on pääasiassa ajateltu. Taulukossa 3 listatut komponentit ovat valmistajan selkeimmin yleiskäyttöisiksi tarkoittamia komponentteja ja sen vuoksi niitä on selvästi vähemmän kuin TI:lla. Myös AD:lla oli useita muitakin raja-arvot täyttäviä komponentteja, mutta ne olivat selkeästi tarkoitettu lähinnä DSL ja PLC -järjestelmien syöttämiseen. [5]

Käyttöjännitteet V_{stot} tarkoittavat jälleen kaksipuolista jännitesyöttöä. Näin ollen AD:n komponentitkaan eivät kykene tuottamaan kovin korkeita lähtöjännitteitä. Taulukon 3 kaikki komponentit on koteloitu SOIC-pintaliitoskoteloihin ja niiden käyttölämpötila saa maksimissaan olla 85°C. [5]

3.3 Apex Microtechnology

Apex Microtechnology valmistaa monia teho-operaatiovahvistimia. Yrityksen yleiskäyttöiset, raja-arvot ylittävät teho-operaatiovahvistimet on listattu taulukossa 4. [9]

Taulukko 4: Apex Microtechnology:n valmistamat yleiskäyttöiset teho-operaatiovahvistimet, jotka täyttävät raja-arvot [9].

<i>Komponentti</i>	<i>I_{out} (typ, mA)</i>	<i>GBW (typ, MHz)</i>	<i>V_{stot} (min, V)</i>	<i>V_{stot} (max, V)</i>	<i>Slew rate (typ, V/μs)</i>
PA107DP	1500	180	40	200	3000
PA96	1500	175	-	300	250
PA09	2000	150	-	80	200
PA119	4000	100	30	80	900
PA98	200	100	-	450	1000
PA85	200	100	-	450	1000
PA91	200	100	-	450	300
PA90	200	100	-	400	300

Taulukosta 4 nähdään, että Apex MT:llä on monia komponentteja, jotka kykenevät sekä suureen virran- että jännitteentuottoon. Parhaimmillaan ne tuottavat useita ampeereja virtaa yli sadan voltin jännitteillä.

Taulukoidut Apex MT:n komponentit ovat koteloitu 8-pinniseen TO-3 tai 12-pinniseen SIP-koteloon. Nämä kotelotyypit eivät ole pintaliitoskotelaita, joten komponentit ovat suurempia, mutta se mahdollistaa komponenttien suuremmat jännite- ja virtakestoisuudet. Vahvistimien suurin käyttölämpötila on yleensä 85°C SIP-koteloisilla komponenteilla ja 125°C TO-3 -koteloisilla komponenteilla. Suuremmat kotelot mahdollistavat komponenttien helpomman kiinnittämisen jäähdytyslevyyn ja siten tehokkaamman jäähdytyksen. [9]

3.4 MSK/Anaren

M.S.Kennedy Co. (MSK) valmistaa useita erilaisia teho-operaatiovahvistimia. Anaren on MSK:n tuotteiden jakelija ja komponentit on listattu Anaren:in verkkosivuilla. Valmistaja mainostaa tuotteidensa kykenevän korkeisiin jännitteen- ja virrantuottoihin leveällä kaistalla ja täyttävän erilaisia sota- ja avaruusteollisuuden vaatimuksia. Taulukossa 5 on listattu MSK:n tuotteet, jotka ylittävät raja-arvot. [10]

Taulukko 5: MSK:n valmistamat yleiskäyttöiset, raja-arvot täyttävät teho-operaatiovahvistimet [10].

<i>Komponentti</i>	<i>I_{out} (mA)</i>	<i>GBW (typ, MHz)</i>	<i>V_{stot} (min, V)</i>	<i>V_{stot} (max, V)</i>	<i>Slew rate (typ, V/μs)</i>
<i>MSK1461</i>	800 (typ)	1200	30	90	500
<i>MSK610</i>	250 (peak)	550	24	36	5000
<i>MSK600</i>	250 (peak)	550	24	36	4200
<i>MSK130</i>	250 (typ)	-	20	400	300

Mainostuksesta huolimatta MSK:lta löytyy vain muutama raja-arvomäärittelyyn sopiva komponentti. Suurin osa komponenteista kykeneekin joko korkeaan virran- tai jännitteen tuottoon tai suureen kaistanleveyteen, eikä kaikkiin samassa komponentissa.

Komponenttien MSK610 ja MSK600 erikoisuutena on, että ne tarvitsevat kaksi jännitesyöttöä. Näistä toinen on korkeiden jännitteiden tuottamista varten. Taulukossa 5 listatut jännitesyötöt näiden komponenttien kohdalla tarkoittavat tavallista V_{cc} -syöttöä, ja lisäksi komponenteissa on V_{HV} -syöttö, johon voidaan kytkeä MSK610:lla max. +130 VDC jännite ja MSK600:lla max. +/- 90 VDC jännite. Tämä mahdollistaa MSK610:lla 110 V_{pp} -lähtöjännitteen ja MSK610:lla 150 V_{pp} -lähtöjännitteen. [10]

MSK130:lle valmistaja ei suoraan ilmoita GBW:tä, mutta komponentin kaistanleveys on luultavimmin riittävä, sillä datalehdessä valmistaja mainitsee komponentin sopivan leveäkaistaisiin ja korkeataajuisiin sovelluksiin. [10]

14-pinninen MSK1461 on saatavilla sekä pintaliitos- että ei-pintaliitoskomponenttina. Sen käyttölämpötilankestävyys on 85°C tai 125°C versiosta riippuen. MSK610 ja MSK600 on koteloitu 12-pinniseen muokattuun DIP-koteloon, jossa on huomioitu kiinnitys jäähdytyslevyyn. MSK130 on koteloitu 10-pinniseen keraamiseen SIP-koteloon. 610, 600 ja 130 kestävät käyttöä max. 125°C lämpötilassa. [10]

3.5 Muut valmistajat

Teho-operaatiovahvistimia etsittiin myös seuraavilta puolijohdevalmistajilta: Advanced Linear Devices, ON Semiconductor (ex-Motorola ja ex-Fairchild), Maxim Integrated Products, Microchip, New Japan Radio Co, Renesas, ST Microelectronics ja Toshiba. Näistä ON Semiconductor:lla, New Japan Radio:lla, Renesas:lla ja ST Microelectronics:lla on tarjolla teho-operaatiovahvistimia.

New Japan Radio:lta (JRC) löytyi yksi raja-arvot suunnilleen täyttävä leveän kaistan komponentti, NJM2723. Sen -3dB BW on 75MHz, slew rate 2000V/ μ s ja V_{stot} välillä 7-35 VDC. Antovirtaa komponentille ei kuitenkaan ilmoiteta, joten sen tehontuottokyvystä ei ole takeita. Komponentin yhdeksi käyttötarkoitukseksi valmistaja kuitenkin mainitsee datalehdessä aktiivisen suodattimen, minkä vuoksi halusin kuitenkin tuoda komponentin esille. JRC:llä oli myös varsinaisia korkeaan virrantuottoon kykeneviä operaatiovahvistimia, mutta niiden suoritusarvot eivät ylittäneet raja-arvoja. [11]

Renesas:lla on raja-arvot osittain täyttäviä komponentteja, mutta ne kaikki tuottavat alle 200 mA antovirtaa tai ovat erityisiin käyttötarkoituksiin tehtyjä komponentteja, kuten DSL ja PLC -syöttövahvistimia tai puskurivahvistimia [12], eikä niitä siksi listattu.

ON Semiconductors:in ja ST Microelectronics:in teho-operaatiovahvistimet eivät puolestaan olleet suoritusarvoiltaan riittäviä. Esimerkiksi ST Microelectronics:lla teho-operaatiovahvistimet eivät kykene riittävään kaistanleveyteen (GBW) tai muutosnopeuteen (slew rate), eli ne ovat liian hitaita [13]. Muilla listatuista valmistajista ei ollut tarjolla tehontuottoon kykeneviä operaatiovahvistimia.

3.6 Havaintoja teho-operaatiovahvistintarjonnasta ja tuotelistauksista

Tuotelistaustutkimuksen perusteella suurin osa markkinoilla olevista teho-operaatiovahvistimista on tarkoitettu erilaisten digitaalisten tiedonsiirtotapojen (esim. DSL ja videoformaatit) syöttövahvistimiksi. Yleinen käyttökohde on myös PLC (power line communication), eli tiedonsiirto tehoverkossa. PLC-käyttöön kehitetyt tehokomponentit saattaisivatkin sopia suodatinsovellukseen, sillä ne on kehitetty tuottamaan vaihtelevia signaaleja tehoverkkoon. Suodatinsovelluskin tuottaisi nopeasti muuttuvia signaaleja tehoverkkoon, joten sen toimintaympäristö on samankaltainen kuin PLC-sovelluksissa. PLC-käyttöön suunnitellut komponentit rajattiin kuitenkin pois, sillä niitä on markkinoilla niin paljon, ettei taulukoiminen olisi tarkoituksenmukaista. Teho-operaatiovahvistimia käytetään myös pienten sähkömoottoreiden ja askelmoottorien tehonsyöttöön sekä erilaisiin radiosovelluksiin, ja näihin tarkoituksiin kehitettyjä komponentteja löytyi valmistajilta myös jonkin verran. Vähemmistö markkinoilla olevista teho-operaatiovahvistimista on yleiskäyttöisiä komponentteja, joita taulukoitiin edellä.

Vaikka moni teho-operaatiovahvistin on suunniteltu käytettäväksi digitaalisissa järjestelmissä, suuri osa vahvistimista on itsessään silti analogisesti toteutettuja. Myös

digitaalisesti toimivia, kvantittuneita lähtösignaaleja tuottavia logiikkakäyttöön suunniteltuja teho-operaatiovahvistimia oli tarjolla, kuten MSK0006 [10].

Muutamilla valmistajilla, kuten Apex Microelectronics:illa, oli myös tarjolla piirilevyille oheiskomponenttien kanssa koottuja tehovahvistimia. Ne jätettiin pois listauksista luvun 3 alun integroidun komponentin määrittelyn vuoksi. Piirilevyille kootuissa tehovahvistimissa oli kuitenkin myös joukossa useita nopeita ja suureen virrantuottoon kykeneviä vahvistimia, jotka ainakin suoritusarvojensa perusteella voisivat toimia suodatinsovelluksessa.

Teho-operaatiovahvistintuotteiden listausta ja vertailua eri valmistajien välillä vaikeuttivat tuotelistausten ja suoritusarvojen määrittelyn valmistajakohtaiset erot. Esimerkiksi osa valmistajista ilmoitti tuotteilleen suoraan GBW:n ja osa vain kaistanleveyden, ja osassa komponenttien datalehdistä ei ilmoitettu esim. antovirran arvoja. Antovirta tosin riippuu myös paljon vahvistimen kuormasta. Taulukointeihin pyrittiin kuitenkin listaamaan eri valmistajien välillä mahdollisimman vertailukelpoiset arvot. Monet taulukoiduista arvoista on etsitty kyseisten komponenttien datalehdistä valmistajien internetlistausten puutteiden vuoksi. Taulukointeja varten tutkittiin läpi useiden kymmenien komponenttien ominaisuuksia ja datalehtiä, minkä vuoksi yksittäisten komponenttien erikoisuuksiin ei äärimmäisen syvällisesti perehdytty.

Käyttötarkoituserittelyissäkin oli eroja. Esimerkiksi Texas Instruments määritteli kunkin tuotteensa käyttötarkoituksen tarkasti, kun taas Apex ja MSK antoivat tuotteilleen lähinnä käyttötarkoitussuosituksia. Useita komponentteja voidaankin käyttää moniin eri tarkoituksiin. Käyttötarkoituksen perusteella tehty taulukoitujen komponenttien valikointi olikin melko karkea rajauskeino, jolla selkeästi tiettyyn tarkoitukseen (esim. DSL) tarkoitettut komponentit jätettiin pois.

Osasta teho-operaatiovahvistimia oli tarjolla myös paljon eri rinnakkaiskomponentteja, jotka olivat numeerisilta suoritusarvoiltaan identtiset, mutta joiden muut ominaisuudet poikkesivat toisistaan. Rinnakkaiskomponenteissa saattoi olla eri määrä kanavia tai lisäominaisuuksia, kuten shutdown (automaattinen sammutus). Taulukoinneissa rinnakkaiskomponentit rajattiin pois ja komponentit listattiin vain, jos numeerisissa suoritusarvoissa oli eroa.

4. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTELMÄT

Tämän kirjallisuus- ja tuotelistaustutkimuksen tarkoituksena oli tutkia yleisesti, millaisiin suoritusarvoihin teho-operaatiovahvistimet tällä hetkellä kykenevät lähinnä korkeataajuus- ja virrantuotto-ominaisuuksiltaan. Tutkittiin myös, minkälaisia suoritusarvoja johdantoluvussa esitelty tehoelektroniikan aiheuttamien häiriöiden suodatin suurin piirtein vaatii toteutuksensa lähtökohtana toimivalta teho-operaatiovahvistimelta, ja onko markkinoilla tällä hetkellä teho-operaatiovahvistinta, joka kykenee näihin suoritusarvoihin. Suodattimen kannalta oleellisten suoritusarvojen valikointi ja niiden numeeristen raja-arvojen määrittely suoritettiin tutkimalla tehoelektroniikan häiriöspektriä kirjallisuuslähteistä.

Raja-arvot ylittäviä yleiskäyttöisiä komponentteja löytyi jonkin verran ja kaiken kaikkiaan kaikki käyttötarkoitukset huomioiden raja-arvomäärittelyyn sopivia komponentteja löytyi kymmeniä. Siksi tiettyyn käyttötarkoitukseen ensisijaisesti suunnitellut komponentit jätettiin listauksista pois, sillä ne mukaan lukien komponenttilistauksista olisi tullut epätarkoituksenmukaisia ja liian pitkiä luettelointeja. Käyttötarkoituksella rajoitettujen luettelointien tarkoitus onkin lähinnä luoda kuvaa, miten paljon kultakin valmistajalta löytyy komponentteja ja hahmottaa numeeristen arvojen suuruusluokkia eri valmistajien välillä.

Tällä hetkellä kaikki käyttötarkoitukset huomioiden ja suoritusarvoja rajaamatta teho-operaatiovahvistimia on tarjolla runsaasti, sillä markkinoilla on useita satoja komponentteja. Määrä tulee myös lisääntymään, sillä valmistajat varmasti kehittävät entistä parempia komponentteja tuttuihin käyttökohteisiin ja luovat täysin uusiin sovelluksiin sopivia komponentteja. Teho-operaatiovahvistimien määrän kasvamista puoltaa erityisesti niiden käyttö erilaisissa digitaalisissa tiedonsiirtoformaateissa sekä sähkölaitteiden integraatioasteen ja modulaarisen rakenteen kasvattamisen jatkuva trendi.

Parhaimmillaan teho-operaatiovahvistimet kykenevät tällä hetkellä satojen ja jopa tuhansien megahertsien kaistanleveyteen, yli ampeerin antovirtoihin ja noin sadan voltin antojännitteisiin. Jotkin markkinoilla olevista vahvistimista tarjoavat leveän kaistan ja korkean antovirran ja -jännitteen jopa samassa komponentissa, tosin korkeiden arvojen saavuttamiseksi vahvistimen kuorman on oltava optimaalinen. Toimiakseen teho-operaatiovahvistimet tarvitsevat yleensä muutamia kymmeniä voltteja kaksipuolista tasajännitesyöttöä. Teho-operaatiovahvistimia on saatavilla sekä tavallisina jalallisinä komponentteina, että pintaliitoskomponentteina.

Tehoelektroniikan aktiivisen häiriösuodattimen toteuttaminen teho-operaatiovahvistimella on mahdollista tänä päivänä, sillä markkinoilta varmasti löytyy suuren tarjonnan vuoksi jokin suodattimessa oikeastikin toimiva komponentti. Osa erityistarkoituksiin tehdyistä komponenteistakin luultavasti kävisi myös suodatinsovellukseen, mutta niiden käypäisyyden arviointi ilman yksityiskohtaisempia tietoja ja tutkimuksia itse suodatinsovelluksesta ja sen todellisista vaatimuksista olisi lähinnä arvailua.

Koska tämä tutkimus on pitkälti kirjallisuustutkimus ja selvitystyö, joka pohjautuu suuresti kaupallisten toimijoiden eli valmistajien ilmoittamaan informaatioon, ei tässä voida antaa absoluuttista tietoa siitä, toimiiko joku numeeriset vaatimukset täyttävä komponentti oikeasti suodattimessa. Lisäksi kaupallisten toimijoiden ilmoittamiin tietoihin on suhtauduttava pienellä varauksella, sillä ne eivät välttämättä ole aina täysin objektiivisiä ja ilmoitetut numeeriset arvot voivat olla hiukan edullisempia kuin todellisuudessa.

Työn tavoitteena oli selvittää teho-operaatiovahvistimien suoritusarvojen suuruusluokkia tällä hetkellä ja etsiä komponentteja suodatinsovellukseen. Suoritusarvoista saatiin taulukoitua tietoa ja löydettiin raja-arvot täyttäviä sekä yleisesti tehontuottoon kykeneviä komponentteja. Näin ollen tutkimuksen tavoitteet toteutuivat.

LÄHTEET

- [1] Aaltonen, J., Kousa, S. & Stor-Pellinen, J. 2002. Elektroniikan perusteet. Kolmas painos. Limes ry.
- [2] Texas Instruments online product catalog, power op amps. [verkkodokumentti]. [viitattu 18.2.2018]. Saatavissa <http://www.ti.com/amplifier-circuit/op-amps/power/overview.html>
- [3] Machine Design, Power OP Amps article, 2002. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.1.2018]. Saatavissa <http://www.machinedesign.com/basics-design/power-op-amps>
- [4] Koskinen, M. 2002. Analogiasuunnittelu. Ensimmäinen painos. Sanoma Magazines Finland.
- [5] Analog Devices & Linear Technology, high output current amplifiers, online catalog. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.3.2018]. Saatavissa <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/operational-amplifiers/high-output-current-amplifiers-greaterthanequalto-100ma.html>
- [6] Niiranen, J. 1997. Tehoelektroniikan komponentit. Otatieto Oy.
- [7] Tihanyi, L. 1995. Electromagnetic Compatibility in Power Electronics. J. K. Eckert & Company Inc. Florida, U.S.A.
- [8] Gulez, K., Uzunoglu, M., Onar, O. C. & Vural, B. 2005. Power Op-Amp Based Active Filter Design with Self Adjustable Gain Control by Neural Networks for EMI Noise Problem. International Conference on Intelligent Computing (ICIC), Hefei, China. August 2005. Advances of Intelligent Computing, Proceedings Pt.1. Springer. S. 243-252.
- [9] Apex Microtechnology, Power Op Amp Selector Tables + datasheets. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.3.2018]. Saatavissa https://www.apexanalog.com/products/linear_selector.html
- [10] Anaren: MSK products, amplifiers + datasheets. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.3.2018]. Saatavissa <https://www.anaren.com/catalog/microelectronics/amplifiers>
- [11] New Japan Radio Co, Hi-Speed/Wide Band Amplifiers. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.3.2018]. Saatavissa https://www.njr.com/semicon/opamp_comparator/opamp.php?cat=1200

[12] Renesas, parametric search. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.3.2018]. Saatavissa <https://www.intersil.com/en/parametricsearch.html?g=amplifiers-and-buffers&sg=line-drivers&f=plc-line-drivers%23g=amplifiers-and-buffers&sg=line-drivers&f=dsl-line-drivers&sort=%5ba1%5d#g=amplifiers-and-buffers&sg=line-drivers&f=plc-line-drivers>

[13] ST Microelectronics, Power Operational Amplifiers. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2018]. Saatavissa <http://www.st.com/en/amplifiers-and-comparators/power-operational-amplifiers.html?querycriteria=productId=SC1592>